

ДИНАМИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ОРБИТ ПАР АСТЕРОИДОВ В ОКРЕСТНОСТИ РЕЗОНАНСОВ

А. Э. Потоскуев, Э. Д. Кузнецов

Уральский федеральный университет

Исследована динамическая эволюция пар астероидов на близких орбитах в окрестности резонансов средних движений с Юпитером ($3 : 1$, $4 : 1$, $5 : 2$, $7 : 3$). Использовались результаты численного интегрирования уравнений движений на интервале 1 млн лет в будущее. Неопределенность начальных элементов орбит и значений скорости дрейфа больших полуосей орбит, обусловленного эффектом Ярковского, существенно влияют на динамическую эволюцию, особенно при начальном расположении объектов в окрестности резонансов. Прохождение через резонанс, как правило, приводит к увеличению расстояния между орбитами.

DYNAMICAL EVOLUTION OF ASTEROID PAIRS IN THE VICINITY OF RESONANCES

A. E. Potoskuev, E. D. Kuznetsov

Ural Federal University

Dynamical evolution of asteroid pairs in close orbits near Jovian mean motion resonances ($3 : 1$, $4 : 1$, $5 : 2$, $7 : 3$) has been researched by means of numerical integrations of the equations of motion over 1 Myr time interval in the future. Initial orbital elements' uncertainty and semi-major axis drift due to the Yarkovsky effect significantly affect orbit modification with time, especially for objects originally situated in the vicinity of resonances. Passing through a resonance generally leads to orbital distance growth.

Введение

Моделирование динамической эволюции орбит малых тел Солнечной системы является комплексной задачей, решение которой требует создания сложных динамических моделей, учитывающих основные возмущающие силы — как гравитационные, так и негравитационные. Важным фактором является близость орбиты рассматриваемого объекта к области резонансов средних движений с планетами (в первую очередь Юпитером и Сатурном). Эволюция орбиты астероида попавшего в резонансную зону, в общем случае носит хаотичный характер, поэтому изучение различных сценариев изменения орбит подобных объектов представляет особый интерес [1].

Пары астероидов, движущихся по близким орбитам, могут иметь общее происхождение [2]. Они могут быть образованы в результате протекания различных процессов: разрушения крупных астероидов при столкновениях с другими малыми телами, процесса дробления астероида под действием YORP-эффекта или распада двойных (кратных) систем астероидов, например, вследствие BYORP-эффекта. Для установления времени (и, возможно, механизма) образования исследуемой пары необходимо исследовать динамическую эволюцию орбит рассматриваемой пары в прошлом. Отметим, что в окрестности резонансов наблюдаются тесные пары, однако среди известных астероидов, сближающихся с Землей, тесных пар не наблюдается. Если взаимодействие с резонансом приведет к переходу пары

астероидов на орбиты, лежащие в области движения планет земной группы, то в дальнейшем гравитационное рассеяние будет способствовать расхождению орбит в результате тесных сближений с массивными планетами.

Целью данной работы является исследование динамической эволюции пар астероидов в окрестности областей резонансов средних движений с Юпитером (3 : 1, 4 : 1, 5 : 2, 7 : 3). Пары астероидов вблизи областей резонансов были отобраны в работе [3] с использованием элементов орбит из базы AstDys [4]. Оценивались метрики Холшевникова [5], которые позволяют оценить близость их орбит в пятимерном пространстве кеплеровых элементов орбит. Исследование эволюции метрик позволит оценить условия, при которых тесная пара сохраняется в окрестности резонанса и при прохождении через резонанс.

Моделирование динамической эволюции

Для исследования динамической эволюции орбит выбранных объектов использовался численный метод. Интегрирование уравнений движения производилось при помощи пакета REBOUND [6] с расширением REBOUNDx [7]. Использовался симплектический интегратор WHFast [8]. Интегрирование выполнялось на интервале 1 млн лет в будущее с шагом 0.02 года. В модели сил учтены возмущения от больших планет, а также от наиболее массивных малых тел — Цереры, Паллады и Весты. Астероиды представлены тестовыми частицами нулевой массы, начальные значения элементов орбит которых варьировались случайным образом в пределах ошибок определения.

В модели сил также учитываются негравитационные возмущения, обусловленные эффектом Ярковского [9]. Влияние суточного эффекта Ярковского проявляется в вековом дрейфе большой полуоси орбиты астероида. Оценка максимума модуля скорости дрейфа $(da/dt)_{max}$ осуществлялась путем нормировки физических и динамических параметров астероида к соответствующим параметрам астероида (101955) Bennu [10]:

$$\left(\frac{da}{dt}\right)_{max} = \left(\frac{da}{dt}\right)_B \cdot \frac{\sqrt{a_B}(1 - e_B^2)}{\sqrt{a}(1 - e^2)} \frac{D_B \rho_B \cos \phi}{D \rho \cos \phi_B} \frac{1 - A}{1 - A_B},$$

где e — эксцентриситет орбиты; D — диаметр астероида; ρ — его плотность; ϕ — наклон оси вращения к плоскости орбиты; A — альбедо Бонда. Величины с индексом B относятся к астероиду (101955) Bennu. В результате каждой тестовой частице случайным образом присваивалось значение дрейфа большой полуоси da/dt из интервала $[-(da/dt)_{max}, (da/dt)_{max}]$.

Список пар астероидов в окрестности резонансов 3 : 1, 4 : 1, 5 : 2, 7 : 33 представлен в таблице. Для каждой пары приведены оценки метрик Холшевникова [5]: q_2 — расстояние в 5-мерном пространстве кеплеровых орбит (не учитывается положение на орбите), q_5 — расстояние в 3-мерном фактор-пространстве позиционных элементов (большая полуось a , эксцентриситет e , наклон i) как минимальное значение q_2 при всех возможных положениях узлов и перигетров орбит. В последнем столбце таблицы даны максимальные значения дрейфа больших полуосей орбит для каждого из астероидов пары.

Обсуждение результатов

В качестве примера рассмотрим орбитальную эволюцию пары (195807) 2002 QF17 — (243587) 1998 DU9, находящейся вблизи резонанса 4 : 1. Орбитальная эволюция астероида (195807) 2002 QF17 не показывает существенных различий при варьировании начальных значений элементов орбит и скорости дрейфа большой полуоси. Астероид (243587) 1998 DU9 располагается на границе резонансной зоны. При варьировании элементов орбиты характер эволюции существенно изменяется уже на интервалах 150–

Пары астероидов вблизи резонансов

Астероиды		$\varrho_2,$ (а. е.) ^{1/2}	$\varrho_5,$ (а. е.) ^{1/2}	$(da/dt)_{max},$ 10 ⁻⁴ а. е./млн лет	
Окрестность резонанса 3 : 1					
(347020) 2010 EV20	(401423) 2013 CX82	0.070787	0.000672	4.63	5.83
(114610) 2003 DN8	2007 CS12	0.080443	0.000735	5.01	8.70
(381833) 2009 WL27	(463437) 2013 MO4	0.109126	0.000491	8.08	7.04
(119332) 2001 SA140	(156388) 2001 YE101	0.134450	0.000515	3.36	3.51
(307726) 2003 UM176	(398159) 2010 FU11	0.145184	0.000823	5.92	4.70
(34991) 4295T-3	(142610) 2002 TU132	0.239192	0.000936	2.20	7.38
Окрестность резонанса 4 : 1					
(184300) 2005 ED114	(422777) 2001 UU227	0.000888	0.000467	7.85	11.89
2015 FZ331	2017 DE15	0.120050	0.000929	10.41	8.27
(371832) 2007 VJ230	2015 KQ23	0.122719	0.000581	12.46	9.46
(218550) 2005 BQ26	(505010) 2011 OH15	0.155420	0.000506	5.29	13.85
(441313) 2008 AX83	(467916) 2011 OA14	0.199180	0.000872	7.55	8.67
(195807) 2002 QF17	(243587) 1998 DU9	0.825368	0.053712	9.99	11.20
Окрестность резонанса 5 : 2					
(388731) 2007 VY242	(468224) 2015 BG132	0.102627	0.000606	5.05	3.83
(55288) 2001 SZ30	(157663) 2005 YB53	0.106499	0.000843	2.02	4.23
(33153) 1998 DH15	(60524) 2000 EA40	0.224301	0.000627	1.25	1.75
2014 JK86	2015 TW218	0.226279	0.000828	4.82	5.06
(323994) 2005 UB234	2014 UE168	0.282895	0.000821	3.42	4.44
(261361) 2005 UF319	(446464) 2014 JK72	0.335230	0.000858	3.85	3.50
Окрестность резонанса 7 : 3					
(422509) 2014 TP5	2014 WX533	0.070337	0.000978	4.14	3.78
(97059) 1999 VU3	(260302) 2004 TK117	0.116597	0.000463	1.63	2.22
(15414) Pettrossi	(140739) 2001 UZ104	0.143784	0.000593	2.06	5.81
(76239) 2000 EF82	(273125) 2006 GR11	0.508237	0.000867	2.29	3.60
(117494) 2005 CU19	(140958) 2001 VT103	0.529204	0.000382	2.52	2.67
(408341) 2013 GR79	(467669) 2008 UN116	0.602428	0.000276	2.85	2.98

200 тыс. лет. Учет дрейфа большой полуоси может приводить к захвату в резонанс. В этом случае характер эволюции становится более регулярным. Подробное рассмотрение данного процесса требует иного подхода в моделировании негравитационных возмущений, обусловленных влиянием эффекта Ярковского, например, использования возмущающего ускорения A_2 [9] вместо скорости дрейфа большой полуоси орбиты.

Поскольку эта пара не является тесной ($\rho_2 \approx 0.8$ (а. е.)^{1/2}, $\rho_5 \approx 0.05$ (а. е.)^{1/2}), динамическая эволюция астероидов качественно отличается. Перигелийное расстояние орбиты астероида (243587) 1998 DU9 в среднем уменьшается (в большинстве случаев орбита астероида начинает пересекать орбиту Земли), в то время как перигелийное расстояние (195807) 2002 QF17, напротив, увеличивается. В результате, сохраняется тенденция к увеличению взаимных расстояний между орбитами при моделировании в будущее, свойственная большинству рассмотренных пар астероидов.

Заключение

В ходе исследования были рассмотрены пары астероидов в окрестности резонансов средних движений с Юпитером 3 : 1, 4 : 1, 5 : 2, 7 : 3. Динамическая эволюция орбит астероидов в окрестности резонанса существенно зависит от значений начальных элементов орбиты, а

также от скорости и знака дрейфа большой полуоси вследствие эффекта Ярковского. Для большинства отобранных пар рассмотренный интервал 1 млн лет является недостаточным, чтобы сделать однозначные выводы о характере эволюции орбит, возможности сохранения тесной пары после прохождения резонанса и т. д. Анализ полученных результатов показывает, что при прохождении областей резонансов в среднем орбиты астероидов, входящих в тесные пары, удаляются друг от друга при моделировании в будущее.

Исследование вероятностей эволюции орбит астероидов, входящих в пары, с учетом ошибок начальных элементов орбит и неопределенности параметров, описывающих влияние эффекта. Для исследования прохождения астероидов через резонанс с учетом влияния эффекта Ярковского будет использоваться негравитационное возмущающее ускорение A_2 .

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, тема FEUZ-2020-0030.

Библиографические ссылки

- [1] *Xu Y. B., Zhou L. Y., Ip W. H.* Transit of asteroids across the 7/3 Kirkwood gap under the Yarkovsky effect // *Astron. Astrophys.* — 2020. — Vol. 637. — P. A19. 2002.08794.
- [2] *Vokrouhlický D., Nesvorný D.* Pairs of Asteroids Probably of a Common Origin // *Astron. J.* — 2008. — Vol. 136. — P. 280–290.
- [3] *Kuznetsov E. D., Potoskuev A. E., Safronova V. S., Ustinov D. S.* Dynamical evolution of asteroid pairs with close orbits // *AIP Conference Proceedings.* — 2019. — Vol. 2103, № 1. — P. 020008.
- [4] *Knezevic Z., Milani A.* Asteroids Dynamic Site-AstDyS // *IAU Joint Discussion.* — 2012. — P. P18.
- [5] *Kholshevnikov K. V., Kokhirova G. I., Babadzhanov P. B., Khamroev U. H.* Metrics in the space of orbits and their application to searching for celestial objects of common origin // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* — 2016. — Vol. 462. — P. 2275–2283.
- [6] *Rein H., Liu S. F.* REBOUND: an open-source multi-purpose N-body code for collisional dynamics // *Astron. Astrophys.* — 2012. — Vol. 537. — P. A128. 1110.4876.
- [7] *Tamayo D., Rein H., Shi P., Hernandez D. M.* REBOUNDx: a library for adding conservative and dissipative forces to otherwise symplectic N-body integrations // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2020. — Vol. 491, № 2. — P. 2885–2901. 1908.05634.
- [8] *Rein H., Tamayo D.* WHFAST: a fast and unbiased implementation of a symplectic Wisdom-Holman integrator for long-term gravitational simulations // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2015. — Vol. 452, № 1. — P. 376–388. 1506.01084.
- [9] *Vokrouhlický D., Bottke W. F., Chesley S. R. et al.* The Yarkovsky and YORP Effects / D. Vokrouhlický, W. F. Bottke, S. R. Chesley et al. // *Asteroids IV* / ed. by Patrick Michel, Francesca E. DeMeo, and William F. Bottke. — University of Arizona Press. — 2015. — P. 509–531.
- [10] *Del Vigna A., Faggioli L., Milani A. et al.* Detecting the Yarkovsky effect among near-Earth asteroids from astrometric data // *Astron. Astrophys.* — 2018. — Vol. 617. — P. A61.